

日 本 国 特 許 庁
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

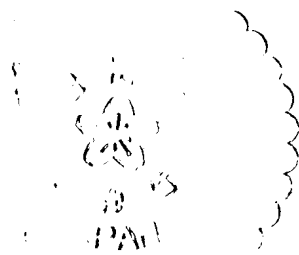
This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日 2 0 0 3 年 2 月 2 6 日
Date of Application:

出 願 番 号 特 願 2 0 0 3 - 0 4 8 8 6 3
Application Number:
[ST. 10/C]: [J P 2 0 0 3 - 0 4 8 8 6 3]

出 願 人 ソニー株式会社
Applicant(s):

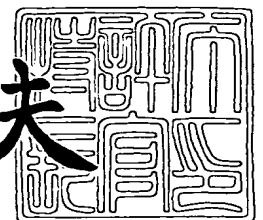
~



2 0 0 3 年 1 2 月 2 日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

今 井 康 夫



【書類名】 特許願

【整理番号】 0390023602

【提出日】 平成15年 2月26日

【あて先】 特許庁長官 太田 信一郎 殿

【国際特許分類】 H01L 21/00

【発明者】

【住所又は居所】 東京都品川区北品川 6 丁目 7 番 3 5 号 ソニー株式会社
内

【氏名】 宇賀神 隆一

【特許出願人】

【識別番号】 000002185

【氏名又は名称】 ソニー株式会社

【代理人】

【識別番号】 100082762

【弁理士】

【氏名又は名称】 杉浦 正知

【電話番号】 03-3980-0339

【選任した代理人】

【識別番号】 100120640

【弁理士】

【氏名又は名称】 森 幸一

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 043812

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 0201252

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 量子カオス装置および量子カオスの制御方法

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する第 1 の領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する第 2 の領域とが互いに隣接して設けられ、上記第 1 の領域と上記第 2 の領域との間で電子の授受が可能であるヘテロ接合を有し、

上記ヘテロ接合に少なくとも接合界面に垂直な成分を有する電界を印加することにより、上記第 1 の領域および上記第 2 の領域からなる系における電子系の量子カオス性を制御する

ことを特徴とする量子カオス装置。

【請求項 2】 上記ヘテロ接合に上記電界を印加するための電極を有することを特徴とする請求項 1 記載の量子カオス装置。

【請求項 3】 上記第 1 の領域が金属状態にあり、上記第 2 の領域がランダムな媒体を有することを特徴とする請求項 1 記載の量子カオス装置。

【請求項 4】 上記第 1 の領域が金属状態にあり、上記第 2 の領域にランダムな磁場が存在することを特徴とする請求項 1 記載の量子カオス装置。

【請求項 5】 上記第 2 の領域に磁性不純物が添加されていることを特徴とする請求項 4 記載の量子カオス装置。

【請求項 6】 上記ヘテロ接合の接合界面に沿う方向の最大寸法が電子のコヒーレンス長以下であることを特徴とする請求項 1 記載の量子カオス装置。

【請求項 7】 上記第 1 の領域および上記第 2 の領域が層状の形状を有することを特徴とする請求項 1 記載の量子カオス装置。

【請求項 8】 上記層状の形状を有する上記第 1 の領域および上記第 2 の領域の少なくとも一方に絶縁膜を介して上記ヘテロ接合に上記電界を印加するための電極が設けられていることを特徴とする請求項 7 記載の量子カオス装置。

【請求項 9】 量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する第 1 の領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する第 2 の領域とが互いに隣接して設けられ、上記第 1 の領域と上記第 2 の領域との間で電子の授受が可能で

あるヘテロ接合を用い、

上記ヘテロ接合に少なくとも接合界面に垂直な成分を有する電界を印加することにより、上記第1の領域および上記第2の領域からなる系における電子系の量子カオス性を制御するようにした

ことを特徴とする量子カオスの制御方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

この発明は、量子カオス装置および量子カオスの制御方法に関し、特に、新規な原理に基づいたものである。

【0002】

【従来の技術】

情報処理を担う物理系として、内在する非線形性は重要である。従来から用いられてきた素子として、ある程度の非線形な応答が見られる材料を用いた電子素子がある。例えば、電流－電圧特性に非線形性があるものとして、微分負抵抗を示す二端子素子が挙げられる。もちろん、三端子素子として、MOS－FETは現代の技術を支えている。そして、これらの非線形性を持つ電子素子を線形な電子回路で結合し、非線形性を持つ情報処理装置を構築することにより、任意の計算を実行することができる。

【0003】

しかしながら、そのような電子回路では、高度に集積化することによる困難が問題になってきている。例えば、発熱の問題である。内在する電気抵抗に起因するこの発熱は、電子素子の非線形性を生み出すために必須であり、情報処理を実行するのに不可欠であって、本質的である。

【0004】

この困難を回避するため、要素素子の非線形性を高めることで素子数を減らす試みがなされてきた。この方向を発展させると必然的に、要素素子がカオスを示す程に強い非線形性を持つものが望まれてくる。カオスを示す古典的な系を量子化したとき、その量子系の振る舞いを特徴付けるのが量子カオスである。

【0005】

一方で、要素素子が微細化されて行くと、その素子に閉じ込められた電子は量子力学的粒子として振る舞うことになる。従って、この観点より、量子カオスを示す要素素子に期待が集まっている。

本発明者は、材料の持つ構造の変化によって、その構造中の電子系における量子カオスの制御が可能であることを理論的に示してきた。例えば、量子ドットの大きさを変化させることにより電子間相互作用の実効的大きさを調整することによる制御（非特許文献1）、フラクタル・アグリゲイト（fractal aggregate）におけるフラクタル次元を制御することによる制御（非特許文献2、3、4）、多重化階層構造における構造制御（非特許文献5）、などが可能なものとして挙げられる。

【0006】

【非特許文献1】

R. Ugajin, Physica A 237, 220(1997)

【非特許文献2】

R. Ugajin, S. Hirata, and Y. Kuroki, Physica A 278, 312(2000)

【非特許文献3】

R. Ugajin, Phys. Lett. A 277, 267(2000)

【非特許文献4】

R. Ugajin, Physica A 301, 1(2001)

【非特許文献5】

R. Ugajin, J. Nanotechnol. 1, 227(2001)

【0007】

さらに、本発明者は、ある種の量子ドットを集合させたアレーにおいて、モット金属-絶縁体転移を、電界効果によって制御し得ることを理論的に示してきた（非特許文献6、7、8、9）。一方で、不純物散乱が激しい層と高純度で不純物散乱が非常に少ない層との結合系に電界を印加することによって、その系の伝導性を制御することができることが示されている（非特許文献10、11）。

【非特許文献6】

R. Ugajin, J. Appl. Phys. 76, 2833 (1994)

【非特許文献 7】

R. Ugajin, Physica E 1, 226 (1997)

【非特許文献 8】

R. Ugajin, Phys. Rev. B 53, 10141 (1996)

【非特許文献 9】

R. Ugajin, J. Phys. Soc. Jpn. 65, 3952 (1996)

【非特許文献 1 0】

H. Sakaki, Jpn. J. Appl. Phys. 21, L381 (1982)

【非特許文献 1 1】

K. Hirakawa, H. Sakaki, and J. Yoshino, Phys. Rev. Lett. 54, 1279 (1985)

【0 0 0 8】

なお、量子準位統計量を用いて量子カオスが発生しているかどうかを検知できることが報告されている（非特許文献 1 2、1 3）。

【非特許文献 1 2】

L. E. Reichl, The transition to chaos: in conservative classical systems: quantum manifestations (Springer, New York, 1992)

【非特許文献 1 3】

F. Haake, Quantum Signatures of chaos, (Springer-Verlag, 1991)

【0 0 0 9】

【発明が解決しようとする課題】

しかしながら、上述の従来の量子カオス発生方法では、量子カオス性を制御することができる範囲は狭い範囲に限定されていたため、より広範囲に量子カオス性を制御することができる技術が求められていた。また、量子カオス性の制御を簡便に行うためには、外部から量子カオス性を制御することができることが望ましい。

【0 0 1 0】

従って、この発明が解決しようとする課題は、量子カオス性を広範囲に、しか

も外部から制御することができる量子カオス装置および量子カオスの制御方法を提供することである。

この発明が解決しようとする他の課題は、単一の材料を用いても、量子カオス性を広範囲に、しかも外部から制御することができる量子カオス装置および量子カオスの制御方法を提供することにある。

【0011】

【課題を解決するための手段】

本発明者は、従来技術が有する上記の課題を解決するために鋭意検討を行った結果、量子カオスを示す金属状態の領域と、可積分性を有するアンダーソン局在状態を持つ領域とが結合した結合構造において、電界効果によって、この構造に閉じ込められた電子系の量子カオス性を従来より広範囲に、しかも外部から制御することができ、しかも単一の材料を用いてもこのような広範囲の制御が可能であることを見出した。

【0012】

一方、マンガン (Mn) などの磁性不純物の添加により実現可能なランダム磁場によって、より強い非線形性を持つ GUE (Gaussian unitary ensemble) 量子カオスが発生することが知られているが、本発明者は、強い非線形性を持つ GUE 量子カオスを示す金属状態の領域と、可積分性を有するアンダーソン局在状態を持つ領域とが結合した結合構造において、電界効果によって、この構造に閉じ込められた電子系の量子カオス性を広範囲に、しかも外部から制御することができ、しかも単一の材料を用いてもこのような広範囲の制御が可能であることを見出した。

【0013】

この発明は、上記の知見に基づいてさらに考察を行った結果、案出されたものである。

すなわち、上記課題を解決するために、この発明の第1の発明は、

量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する第1の領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する第2の領域とが互いに隣接して設けられ、第1の領域と第2の領域との間で電子の授受が可能であるヘテロ接合を有し、

そのヘテロ接合に少なくとも接合界面に垂直な成分を有する電界を印加することにより、第1の領域および第2の領域からなる系における電子系の量子カオス性を制御する

ことを特徴とする量子カオス装置である。

【0014】

この発明の第2の発明は、

量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する第1の領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する第2の領域とが互いに隣接して設けられ、第1の領域と第2の領域との間で電子の授受が可能であるヘテロ接合を用い、

そのヘテロ接合に少なくとも接合界面に垂直な成分を有する電界を印加することにより、第1の領域および第2の領域からなる系における電子系の量子カオス性を制御するようにした

ことを特徴とする量子カオスの制御方法である。

【0015】

この発明において、「ヘテロ接合」とは、量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する第1の領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する第2の領域とが互いに隣接（あるいは接触）することにより形成される接合であるが、これは電子系の性質が互いに異なる二つの領域が互いに隣接することにより形成される接合を意味し、同種の方法を用いるものであっても、異種材料を用いるものであってもよい。これらの材料としては、基本的にはどのような種類のものを用いてもよいが、具体的には、例えば半導体（SiやGeなどの元素半導体、GaAs、GaP、GaNなどのIII-V族化合物半導体、ZnSeなどのII-VI族化合物半導体など）である。第1の領域および第2の領域は、典型的には結晶からなり、一般的には層状の形状を有する。より具体的には、ヘテロ接合は、例えば、各種の結晶成長法を用いて第1の領域となる結晶層および第2の領域となる結晶層を成長させることにより形成される。第1の領域および第2の領域の境界部には遷移領域が存在する場合もあるが、この場合でも必要な物性を発現させる上で基本的な相違はない。

【0016】

典型的には、量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する第1の領域は金属状態にあり、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する第2の領域はランダム（乱雑）な媒体を有し、あるいはランダム磁場が存在する。ランダムな媒体は、ランダムなポテンシャルが電子に働くものであれば、基本的にはどのようなものであってもよいが、典型的には不純物や格子欠陥などである。また、ランダム磁場は、典型的にはMnなどの磁性不純物の添加により発生する。

このヘテロ接合においては、量子カオス発現の観点より、好適には、接合界面に沿う方向の最大寸法を電子のコヒーレンス長以下とする。

【0017】

ヘテロ接合に少なくとも接合界面に垂直な成分を有する電界を印加するためには、一般的にはこのヘテロ接合に電界印加用の電極が設けられる。例えば、ヘテロ接合を構成する第1の領域および第2の領域の少なくとも一方に電極が設けられる。この場合、電極の電氣的絶縁のために、これらの電極は絶縁膜を介して設ける。特に、上記のように第1の領域および第2の領域が層状の形状を有する場合には、これらの第1の領域および第2の領域の少なくとも一方に絶縁膜を介して電極が設けられる。

量子カオス装置においては、必要に応じて、上記のヘテロ接合および電極に加えて、電気信号の入出力のための配線が設けられる。

【0018】

上述のように構成されたこの発明によれば、量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する第1の領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する第2の領域とからなるヘテロ接合に電界を印加することによって、これらの第1の領域および第2の領域からなる系の電子系を、典型的な量子カオスを示す状態からアンダーソン局在を示す状態まで自在に制御することができる。また、これはヘテロ接合の形成に用いる材料の種類によらない。

【0019】

【発明の実施の形態】

以下、この発明の実施形態について説明する。

第1の実施形態

この第1の実施形態においては、量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する領域との結合系であるヘテロ接合を用いた量子カオス装置について説明する。

【0020】

この第1の実施形態を説明する前に、二次元の正方格子上の電子、より詳細には二次元ランダムポテンシャル中の電子状態について説明する。

いま、図1に示すように、一辺がLサイトからなる正方格子を考える。図1において、各格子点を黒丸で示す。この正方格子のp番目の格子点に量子を生成する演算子

【数1】

$$\hat{c}_p^\dagger$$

を定義する。ここで、この量子系のハミルトニアン

【数2】

$$\hat{H}_2$$

は以下のように定義される。

【数3】

$$\hat{H}_2 = -t \sum_{\langle p, q \rangle} \hat{c}_p^\dagger \hat{c}_q + \sum_p v_p \hat{c}_p^\dagger \hat{c}_p + \text{H.C.} \quad (1)$$

ただしここで、 $\langle p, q \rangle$ は最近接サイトを意味する。また、 t はトランスファーである。ランダムポテンシャルは v_p によって導入される。ここで、 v_p は

【数4】

$$-V/2 < v_p < V/2 \quad (2)$$

により生成されるランダム変数である。ランダムポテンシャルは、具体的には、例えば、不純物の添加や格子欠陥の導入などにより導入することができる。

【0021】

V/t が充分大きければアンダーソン局在を起こし、絶縁状態となっているであろう。 V/t が充分小さければ、金属状態のフェルミ液体となる。無限の二次元系では、ランダムポテンシャルの強度がどれほど小さくても、ゼロでなければ、すべての一電子状態は局在することが知られている。しかしながら、有限の局

在長を有するのであるから、ここで考えている系のサイズ（格子点間距離を a とすると La ）より局在長が長ければ、この有限領域内では金属的な状態として振る舞う。

【0022】

ハミルトニアン

【数5】

\hat{H}_2

の固有エネルギーを

【数6】

ϵ_m

、固有ベクトルを $|m\rangle$ と書くと、

【数7】

$$\hat{H}_2|m\rangle = \epsilon_m|m\rangle \quad (3)$$

である。ただし、 $m=0, 1, 2, \dots, n$ である。

【0023】

まず、 $n+1$ 個の量子準位

【数8】

ϵ_m

を、その最近接準位間間隔が平均で 1 になるように規格化する。つまり、

【数9】

$$\omega_j = \epsilon_j - \epsilon_{j-1} \quad (4)$$

とする。ただし、 $j=1, 2, \dots, n$ としたとき、

【数10】

$$\bar{\omega} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \omega_j \quad (5)$$

を用い、新しい準位

【数11】

$$\epsilon_0 = 0 \quad (6)$$

$$\epsilon_m = \frac{1}{\bar{\omega}} \sum_{j=1}^m \omega_j = \sum_{j=1}^m \Omega_j \quad (7)$$

へ変換する。ここで、

【数 1 2】

$$\Omega_j = \frac{\omega_j}{\bar{\omega}} \quad (8)$$

である。系の状態密度 (the density of states) は

【数 1 3】

$$\rho(\epsilon) = \frac{1}{n+1} \sum_{m=0}^n \delta(\epsilon - \epsilon_m) \quad (9)$$

で定義され、その積分 (the staircase function)

【数 1 4】

$$\lambda(\epsilon) = \int_{-\infty}^{\epsilon} d\eta \rho(\eta) \quad (10)$$

を計算する。得られたstaircase functionは、アンフォールディング (unfolding) という操作を用いることにより、平均して状態密度が一定になるように変換される。このようにして得られた量子準位を用い、量子準位統計量として最近接準位間間隔分布 $P(s)$ とダイソンとメータの Δ_3 統計量を計算する。上記非特許文献 1 2, 1 3 に記載されているように、これらの統計量を用いることで、量子カオスが発生しているかどうかを検知することができる。量子カオス系は、古典的カオス系と同様に外部からの摂動に対して敏感であることも知られており、非線形材料設計の指針として量子カオス解析は重要である。

【0 0 2 4】

可積分系の場合、最近接準位間間隔分布 $P(s)$ と Δ_3 統計量はPoisson 分布のもの

【数 1 5】

$$P_P(s) = e^{-s} \quad (11)$$

$$\Delta_3(n) = \frac{n}{15} \quad (12)$$

で良く記述され、量子カオス系の場合、GOE (Gaussian orthogonal ensemble) 分布のもの

【数 16】

$$P_{\text{GOE}}(s) = \frac{\pi s}{2} e^{-\pi s^2/4} \quad (13)$$

$$\Delta_3(n) = \frac{1}{\pi^2} \left[\log(2\pi n) + \gamma - \frac{\pi^2}{8} - \frac{5}{4} \right] + O(n^{-1}) \quad (14)$$

で良く記述される。ここで、 γ はオイラー定数である。

【0025】

以下に示す数値計算では $L = 40$ とし、周期的境界条件を用いることにする。全状態数は $L^2 = 1600$ である。量子準位は $n = 201$ から $n = 800$ のものを利用した。 $t = 1$ を固定し、 V を調整して量子カオス性を制御する。

【0026】

図2に最近接準位間間隔分布 $P(s)$ を、図3に Δ_3 統計量を示した。 V として $V = 2, 6, 10, 14, 18, 22$ を用いた。 $V = 2$ の場合、系の量子準位統計は GOE のもので良く記述され、金属的な量子カオス状態であることが分かる。一方で、 $V = 22$ の場合、系の量子準位統計は Poisson 分布のもので良く記述され、アンダーソン局在状態（可積分系）であることが分かる。 $V = 2$ から $V = 22$ の変化に伴って、量子カオス系から可積分系への変化が見られている。

【0027】

さて、この第1の実施形態による量子カオス装置について説明する。

図4に示すように、一辺が L サイトからなる正方格子を二層考える。これらの二層によりヘテロ接合が形成されている。これらの層の最大寸法（格子点間距離を a とすると $\sqrt{2}La$ ）は、電子のコヒーレンス長以下である。第1層の p 番目の格子点に量子を生成する演算子

【数 17】

$$\hat{c}_p^\dagger$$

を定義する。また、第2層の p 番目の格子点に量子を生成する演算子

【数 18】

$$\hat{d}_p^\dagger$$

を定義する。ここで、この量子系のハミルトニアン

【数 19】

 \hat{H}

は以下のように定義される。

【数 20】

$$\begin{aligned} \hat{H} = & -t_1 \sum_{\langle p, q \rangle} \hat{c}_p^\dagger \hat{c}_q - t_2 \sum_{\langle p, q \rangle} \hat{d}_p^\dagger \hat{d}_q - t_3 \sum_p \hat{c}_p^\dagger \hat{d}_p \\ & + \sum_p v_p \hat{c}_p^\dagger \hat{c}_p + \sum_p w_p \hat{d}_p^\dagger \hat{d}_p + \frac{\phi}{2} \sum_p (\hat{c}_p^\dagger \hat{c}_p - \hat{d}_p^\dagger \hat{d}_p) + \text{H.C.} \end{aligned} \quad (15)$$

ただしここで、 $\langle p, q \rangle$ は最近接サイトを意味する。また、 t_1 は第1層のトランスファー、 t_2 は第2層のトランスファー、 t_3 は第1層と第2層との間のトランスファーである。第1層のランダムポテンシャルは v_p によって導入される。ここで、 v_p は

【数 21】

$$-V_1/2 < v_p < V_1/2 \quad (16)$$

により生成されるランダム変数である。また、第2層のランダムポテンシャルは w_p によって導入される。ここで、 w_p は

【数 22】

$$-V_2/2 < w_p < V_2/2 \quad (17)$$

により生成されるランダム変数である。これらのランダムポテンシャルは、具体的には、例えば、不純物の添加や格子欠陥の導入などにより導入することができる。

【0028】

この場合、 V_1 / t_1 と V_2 / t_2 との大小関係に応じて、第1層および第2層の一方が量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する領域あるいは可積分性によって特徴付けられる電子系を有する領域となり、他方が可積分性によって特徴付けられる電子系を有する領域あるいは量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する領域となる。例えば、 $V_1 / t_1 < V_2 / t_2$ の場合には、第1の層が量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する領域、第2の層が可積分性によって特徴付けられる電子系を有する領域となる。

【0 0 2 9】

この場合、第1層の下側および第2層の上側に、少なくともこれらの層の全面を覆う大きさの電極（図示せず）がそれぞれ設けられている。そして、これらの電極に電圧を印加することにより、それらを貫通するように z 軸方向の電界を均一に印加することができるようになっている。

【0 0 3 0】

まず最も単純な場合、 $t_3 = 0$ の、第1層と第2層とが分離されている場合を考える。 V_1 / t_1 が十分に小さければ、第1層は金属状態のフェルミ液体となる。 V_2 / t_2 が十分に大きければ、第2層はアンダーソン局在を起こし、絶縁状態となっているであろう。

次に、 $t_3 > 0$ の場合を考える。この時、二つの層は量子的な結合をする。 ϕ は、二層間の平均的ポテンシャル差として導入されており、このパラメータが、これらの層を貫く電界の強度に比例することになる。 ϕ をパラメータとして系の量子状態がどのように変化していくかが問題となる。

【0 0 3 1】

以下に示す数値計算では $L = 40$ とし、各層に周期的境界条件を用いることにする。全状態数は $2L^2 = 3200$ である。数値対角化によりエネルギー固有値を求め、上述の方法により量子準位統計量を計算する。量子準位としては $n = 201$ から $n = 800$ のものを利用した。以下の計算では、 $t_1 = t_2 = 1$ 、 $t_3 = 0.5$ 、 $V_1 = 2$ 、 $V_2 = 20$ を固定し、 ϕ を調整して量子カオス性を制御する。

【0 0 3 2】

図5に最近接準位間間隔分布 $P(s)$ を、図6に Δ_3 統計量を示した。 ϕ の値としては、 $\phi = -4$ 、 -2.4 、 -0.8 、 0.8 、 2.4 、 4 を用いた。 $\phi = -4$ の場合、電子はポテンシャルエネルギーの低い第1層に多くの振幅を持って存在する。この時、GOE分布で良く記述される量子カオス状態になっている。 ϕ の増加に伴って、ランダムポテンシャルによる散乱の激しい第2層での振幅が増大し、量子準位統計は変化していく。 $\phi = 4$ にまでなると、電子はポテンシャルエネルギーの低い第2層に多くの振幅を持って存在し、アンダーソン局在を起

こして可積分的なPoisson 分布に従うことが分かる。

【0033】

以上の解析から、 ϕ の変化、つまりこれらの二層を貫く電界強度の変化によって、この量子系の量子カオス性を制御することができることが分かる。

なお、伝導性に着目している範囲で、アンダーソン局在の状態と金属状態との切替えに関してはSakakiらによる議論がある（上記非特許文献10、11）。

【0034】

図7にこの第1の実施形態による量子カオス装置の具体的な構造例を示す。図7に示すように、この量子カオス装置においては、第1層としての結晶層11と第2層としての結晶層12とがトンネルバリアとしての結晶層13を介して量子力学的に結合してヘテロ接合が形成されている。ここで、第1層としての結晶層11はアンドープで高純度、第2層としての結晶層12には不純物が高濃度（例えば $(1 \sim 2) \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ）にドーピングされている。そして、結晶層11の裏面に絶縁膜14を介して電極15が形成され、結晶層12の上面に絶縁膜16を介して電極17が形成されている。

【0035】

この量子カオス装置は、例えば次のようにして製造することができる。すなわち、図8Aに示すように、基板18上に結晶層11、13、12を順次成長させる。結晶成長法としては、有機金属化学気相成長（MOCVD）法や分子線エピタキシー（MBE）法などを用いることができる。結晶層12には、結晶成長の際に不純物を必要な量だけドーピングする。次に、結晶層12上に絶縁膜16を形成し、さらにその上に導電膜、例えば金属膜を形成して電極17を形成する。次に、図8Bに示すように、基板18を裏面研磨などにより除去する。次に、図8Cに示すように、露出した結晶層11上に絶縁膜14を形成し、さらにその上に導電膜、例えば金属膜を形成して電極15を形成する。次に、この積層構造体をリソグラフィーおよびエッチングにより所定形状にパターニングする。以上により、図7に示す量子カオス装置が得られる。

【0036】

材料の具体例を挙げると、結晶層11としてアンドープGaAs層、結晶層1

2としてSiドープGaAs層、結晶層13としてアンドープAlGaAs層（Al組成は例えば0.3）、絶縁膜14、16としてSiO₂膜、電極15、17としてAl膜、基板18として半絶縁性GaAs基板を用いる。

【0037】

図9にこの第1の実施形態による量子カオス装置の他の構造例を示す。図9に示すように、この量子カオス装置においては、第1層としての結晶層21と第2層としての結晶層22とがトンネルバリアとしての結晶層23を介して量子力学的に結合してヘテロ接合が形成されている。ここで、第1層としての結晶層21には格子欠陥が実質的に存在せず（あるいは格子欠陥が極めて少ない）、第2層としての結晶層22には格子欠陥が少なくとも結晶層21よりも多く存在する。さらに、結晶層21にはスペーサ層としての結晶層24、電子供給層としての結晶層25および絶縁層としての結晶層26が順次接合され、結晶層22には絶縁層としての結晶層27が接合されている。そして、結晶層26の裏面に電極28が形成され、結晶層27の上面に電極29が形成されている。

この量子カオス装置の製造方法は、図7に示す量子カオス装置の製造方法とほぼ同様であるので説明を省略する。

【0038】

材料の具体例を挙げると、結晶層21、22としてアンドープGaAs層、結晶層23、24、26、27としてアンドープAlGaAs層（Al組成は例えば0.3）、結晶層25としてSiドープAlGaAs層（Al組成は例えば0.3）、電極28、29としてAl膜を用いる。

【0039】

この図9に示す量子カオス装置においては、結晶層25から供給される電子が格子欠陥のない結晶層21に存在する時、系は金属的に振る舞い、電極28、29間の電位差によって電子が格子欠陥のある結晶層22に引き付けられると、系はアンダーソン局在相へと転移を起こす。

【0040】

以上のように、この第1の実施形態によれば、量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する領

域とを結合させてヘテロ接合を形成し、このヘテロ接合に接合界面に垂直な電界を印加することによって、外部から、これらの領域からなる系における電子系の量子カオス性を広範囲にしかも簡便に制御することができる。また、このヘテロ接合は、単一の材料を用いて容易に製造することができる。

【0041】

第2の実施形態

この第2の実施形態による量子カオス装置は、量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する領域との結合系であるヘテロ接合を用いた量子カオス装置であるが、この場合、ランダムポテンシャルを導入するための不純物として特に磁性不純物を用いる。

【0042】

この第2の実施形態を説明する前に、二次元の正方格子上の電子、より詳細には二次元ランダムポテンシャル中の電子状態について説明する。

いま、図1に示すように、一辺がLサイトからなる正方格子を考える。この正方格子のp番目の格子点に量子を生成する演算子

【数23】

$$\hat{c}_p^\dagger$$

を定義する。ここで、この量子系のハミルトニアン

【数24】

$$\hat{H}_2$$

は以下のように定義される。

【数25】

$$\hat{H}_2 = - \sum_{\langle p, q \rangle} t_{p, q} \hat{c}_p^\dagger \hat{c}_q + \sum_p v_p \hat{c}_p^\dagger \hat{c}_p + \text{H.C.} \quad (18)$$

ただしここで、 $\langle p, q \rangle$ は最近接サイトを意味する。ランダムポテンシャルは v_p によって導入される。ここで、 v_p は

【数26】

$$-V/2 < v_p < V/2 \quad (19)$$

により生成されるランダム変数である。ランダムポテンシャルは、具体的には、

例えば、不純物の添加や格子欠陥の導入などにより導入することができる。トランスファース $t_{p,q}$ は

【数 2 7】

$$t_{p,q} = \exp(2\pi i \theta_{p,q}) \quad (20)$$

であり、 $\theta_{p,q}$ は $\theta_{p,q} = -\theta_{q,p}$ を満たし、 $|\theta_{p,q}| < \xi/2$ により生成されるランダム変数である。 $\xi > 0$ の時にランダム磁場が導入される。

【0 0 4 3】

V が充分大きければアンダーソン局在を起こし、絶縁状態となっているであろう。 V が充分小さければ、金属状態のフェルミ液体となる。すでに述べたように、無限の二次元系では、ランダムポテンシャルの強度がどれほど小さくても、ゼロでなければ、すべての一電子状態は局在することが知られている。しかしながら、有限の局在長を有するのであるから、ここで考えている系のサイズ L_a より局在長が長ければ、この有限領域内では金属的な状態として振る舞う。

【0 0 4 4】

ハミルトニアン

【数 2 8】

\hat{H}_2

の固有エネルギーを

【数 2 9】

ϵ_m

、固有ベクトルを $|m\rangle$ と書くと、

【数 3 0】

$$\hat{H}_2|m\rangle = \epsilon_m|m\rangle \quad (21)$$

である。ただし、 $m = 0, 1, 2, \dots, n$ である。

【0 0 4 5】

まず、 $n + 1$ 個の量子準位

【数 3 1】

ϵ_m

を、その最近接準位間間隔が平均で 1 になるように規格化する。つまり、

【数 3 2】

$$\omega_j = \epsilon_j - \epsilon_{j-1} \quad (22)$$

とする。ただし、 $j = 1, 2, \dots, n$ としたとき、

【数 3 3】

$$\bar{\omega} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \omega_j \quad (23)$$

を用い、新しい準位

【数 3 4】

$$\epsilon_0 = 0 \quad (24)$$

$$\epsilon_m = \frac{1}{\bar{\omega}} \sum_{j=1}^m \omega_j = \sum_{j=1}^m \Omega_j \quad (25)$$

へ変換する。ここで、

【数 3 5】

$$\Omega_j = \frac{\omega_j}{\bar{\omega}} \quad (26)$$

である。系の状態密度は

【数 3 6】

$$\rho(\epsilon) = \frac{1}{n+1} \sum_{m=0}^n \delta(\epsilon - \epsilon_m) \quad (27)$$

で定義され、その積分

【数 3 7】

$$\lambda(\epsilon) = \int_{-\infty}^{\epsilon} d\eta \rho(\eta) \quad (28)$$

を計算する。得られたstaircase functionは、アンフォールディングという操作を用いることにより、平均して状態密度が一定になるように変換される。このようにして得られた量子準位を用い、量子準位統計量として最近接準位間間隔分布 $P(s)$ ダイソンとメータの Δ_3 統計量を計算する。すでに述べたように、これらの統計量を用いることで、量子カオスが発生しているかどうかを検知することができる。

【0046】

可積分系の場合、最近接準位間間隔分布 $P(s)$ と Δ_3 統計量はPoisson 分布のもの

【数 3 8】

$$P_P(s) = e^{-s} \quad (29)$$

$$\Delta_3(n) = \frac{n}{15} \quad (30)$$

で良く記述され、量子カオス系の場合、GUE (Gaussian unitary ensemble) 分布のもの

【数 3 9】

$$P_{\text{GUE}}(s) = \frac{32s^2}{\pi^2} e^{-4s^2/\pi} \quad (31)$$

$$\Delta_3(n) = \frac{1}{2\pi^2} \left[\log(2\pi n) + \gamma - \frac{5}{4} \right] + O(n^{-1}) \quad (32)$$

で良く記述される。ここで、 γ はオイラー定数である。

【0 0 4 7】

以下に示す数値計算では $L = 60$ とし、周期的境界条件を用いることにする。全状態数は $L^2 = 3600$ である。量子準位は $n = 201$ から $n = 1800$ のものを利用した。 $\xi = 0.1$ を固定し、 V を調整して量子カオス性を制御する。

【0 0 4 8】

図 1 0 に最近接準位間間隔分布 $P(s)$ を、図 1 1 に Δ_3 統計量を示した。 V として $V = 2, 6, 10, 14, 18, 22$ を用いた。 $V = 2$ の場合、系の量子準位統計はGOEのものでほぼ記述され、金属的な量子カオス状態であることが分かる。詳しく見てみると、量子カオス系からのずれが見てとれる。これは、系が二次元であるため、アンダーソン局在の影響が出ているからである。一方で、 $V = 22$ の場合、系の量子準位統計はPoisson 分布のもので良く記述され、アンダーソン局在状態（可積分系）であることが分かる。 $V = 2$ から $V = 22$ の変化に伴って、量子カオス系から可積分系への変化が見られている。

【0 0 4 9】

さて、この第 2 の実施形態による量子カオス装置について説明する。

第 1 の実施形態と同様に、図 4 に示すように、一辺が L サイトからなる正方格子を二層考える。これらの二層によりヘテロ接合が形成されている。これらの層

の最大寸法（格子点間距離を a とすると $\sqrt{2}La$ ）は、電子のコヒーレンス長以下である。第 1 層の p 番目の格子点に量子を生成する演算子

【数 4 0】

$$\hat{c}_p^\dagger$$

を定義する。また、第 2 層の p 番目の格子点に量子を生成する演算子

【数 4 1】

$$\hat{d}_p^\dagger$$

を定義する。ここで、この量子系のハミルトニアン

【数 4 2】

$$\hat{H}$$

は以下のように定義される。

【数 4 3】

$$\begin{aligned} \hat{H} = & - \sum_{(p,q)} t_{p,q}^{(1)} \hat{c}_p^\dagger \hat{c}_q - \sum_{(p,q)} t_{p,q}^{(2)} \hat{d}_p^\dagger \hat{d}_q - \sum_p t_p^{(3)} \hat{c}_p^\dagger \hat{d}_p \\ & + \sum_p v_p \hat{c}_p^\dagger \hat{c}_p + \sum_p w_p \hat{d}_p^\dagger \hat{d}_p + \frac{\phi}{2} \sum_p (\hat{c}_p^\dagger \hat{c}_p - \hat{d}_p^\dagger \hat{d}_p) + \text{H.C.} \end{aligned} \quad (33)$$

ただしここで、 $\langle p, q \rangle$ は最近接サイトを意味する。第 1 層のランダムポテンシャルは v_p によって導入される。ここで、 v_p は

【数 4 4】

$$-V_1/2 < v_p < V_1/2 \quad (34)$$

により生成されるランダム変数である。また、第 2 層のランダムポテンシャルは w_p によって導入される。ここで、 w_p は

【数 4 5】

$$-V_2/2 < w_p < V_2/2 \quad (35)$$

により生成されるランダム変数である。これらのランダムポテンシャルは、具体的には、例えば、不純物の添加や格子欠陥の導入などにより導入することができる。トランスファー

【数 4 6】

$$t_{p,q}^{(1)}, t_{p,q}^{(2)}, t_p^{(3)}$$

は

【数 4 7】

$$t_{p,q}^{(1)} = t_1 \exp(2\pi i \theta_{p,q}^{(1)}) \quad (36)$$

$$t_{p,q}^{(2)} = t_2 \exp(2\pi i \theta_{p,q}^{(2)}) \quad (37)$$

$$t_p^{(3)} = t_3 \exp(2\pi i \theta_p^{(3)}) \quad (38)$$

であり、

【数 4 8】

$$\theta_{p,q}^{(1)} = -\theta_{q,p}^{(1)}, \quad \theta_{p,q}^{(2)} = -\theta_{q,p}^{(2)}$$

を満たし、

【数 4 9】

$$|\theta_{p,q}^{(1)}| < \xi/2, \quad |\theta_{p,q}^{(2)}| < \xi/2, \quad |\theta_p^{(3)}| < \xi/2$$

により生成されるランダム変数である。 $\xi > 0$ の時にランダム磁場が導入される。

。

【0 0 5 0】

まず最も単純な場合、 $t_3 = 0$ の、第1層と第2層とが分離されている場合を考える。 V_1 / t_1 が充分小さければ、第1層は金属状態のフェルミ液体となる。 V_2 / t_2 が充分大きければ、第2層はアンダーソン局在を起こし、絶縁状態となっているであろう。

次に、 $t_3 > 0$ の場合を考える。この時、これらの二つの層は量子的な結合をする。 ϕ は、二層間の平均的ポテンシャル差として導入されており、このパラメータが、これらの層を貫く電界に比例することになる。 ϕ をパラメータとして系の量子状態がどのように変化していくかが問題となる。

【0 0 5 1】

以下に示す数値計算では $L = 60$ とし、各層に周期的境界条件を用いることにする。全状態数は $2L^2 = 7200$ である。数値対角化によりエネルギー固有値を求め、上述の方法により量子準位統計量を計算する。量子準位としては $n = 201$ から $n = 1800$ のものを利用した。以下の計算では、 $t_1 = t_2 = 1$ 、 $t_3 = 0.5$ 、 $V_1 = 1$ 、 $V_2 = 12$ 、 $\xi = 0.1$ を固定し、 ϕ を調整して量子カオス性を制御する。

【0052】

図12に最近接準位間間隔分布 $P(s)$ を、図13に Δ_3 統計量を示した。 ϕ の値としては、 $\phi = -4, -2.4, -0.8, 0.8, 2.4, 4$ を用いた。 $\phi = -4$ の場合、電子はポテンシャルエネルギーの低い第1層に多くの振幅を持って存在する。この時、GUE分布で良く記述される量子カオス状態になっている。 ϕ の増加に伴って、ランダムポテンシャルによる散乱の激しい第2層での振幅が増大し、量子準位統計は変化していく。 $\phi = 4$ にまでなると、電子はポテンシャルエネルギーの低い第2層に多くの振幅を持って存在し、アンダーソン局在を起こして可積分的なPoisson 分布に従うことが分かる。

【0053】

以上の解析から、 ϕ の変化、つまりこれらの二層を貫く電界強度の変化によって、この量子系の量子カオス性を制御することができることが分かる。

上記以外のことは、第1の実施形態と同様である。

【0054】

以上のように、この第2の実施形態によれば、量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する領域とを結合させ、またランダムポテンシャルの導入に磁性不純物の添加を用いてヘテロ接合を形成し、このヘテロ接合に接合界面に垂直な電界を印加することによって、外部から、これらの領域からなる系における電子系の量子カオス性を広範囲にしかも簡便に制御することができる。また、このヘテロ接合は、単一の材料を用いて容易に製造することができる。

【0055】

以上、この発明の実施形態につき具体的に説明したが、この発明は、上述の実施形態に限定されるものではなく、この発明の技術的思想に基づく各種の変形が可能である。

例えば、上述の実施形態において挙げた数値、構造、形状、材料などはあくまでも例に過ぎず、必要に応じてこれらと異なる数値、構造、形状、材料などを用いてもよい。

【0056】

【発明の効果】

以上説明したように、この発明によれば、量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する第1の領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する第2の領域とを、それらの間で電子の授受が可能な状態で互いに隣接して設けることによりヘテロ接合を形成し、このヘテロ接合に少なくとも接合界面に垂直な成分を有する電界を印加することにより、これらの第1の領域および第2の領域からなる系における電子系の量子カオス性を広範囲にしかも外部から制御することができ、また単一の材料を用いてもこのような広範囲の制御が可能である。

【図面の簡単な説明】**【図1】**

二次元ランダムポテンシャル中の電子状態を説明するための略線図である。

【図2】

図1に示すモデルを用いてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。

【図3】

図1に示すモデルを用いてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。

【図4】

この発明の第1の実施形態による量子カオス装置の要部を模式化して示す略線図である。

【図5】

この発明の第1の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。

【図6】

この発明の第1の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。

【図7】

この発明の第1の実施形態による量子カオス装置の具体的な構造例を示す断面図である。

【図 8】

この発明の第 1 の実施形態による量子カオス装置の製造方法を説明するための断面図である。

【図 9】

この発明の第 1 の実施形態による量子カオス装置の他の構造例を示す断面図である。

【図 10】

図 1 に示すモデルを用いてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。

【図 11】

図 1 に示すモデルを用いてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。

【図 12】

この発明の第 2 の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。

【図 13】

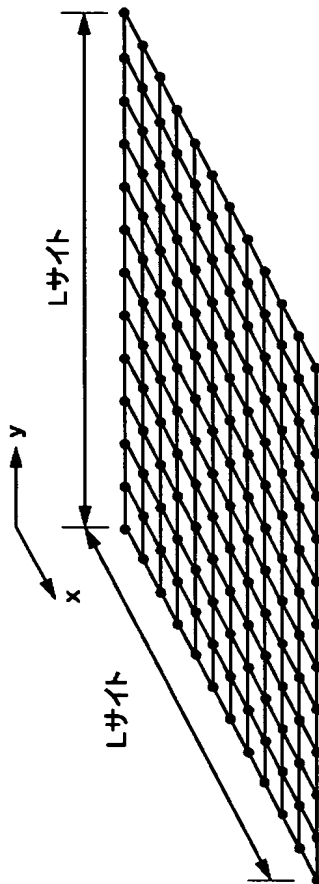
この発明の第 2 の実施形態においてシミュレーションにより得られた結果を示す略線図である。

【符号の説明】

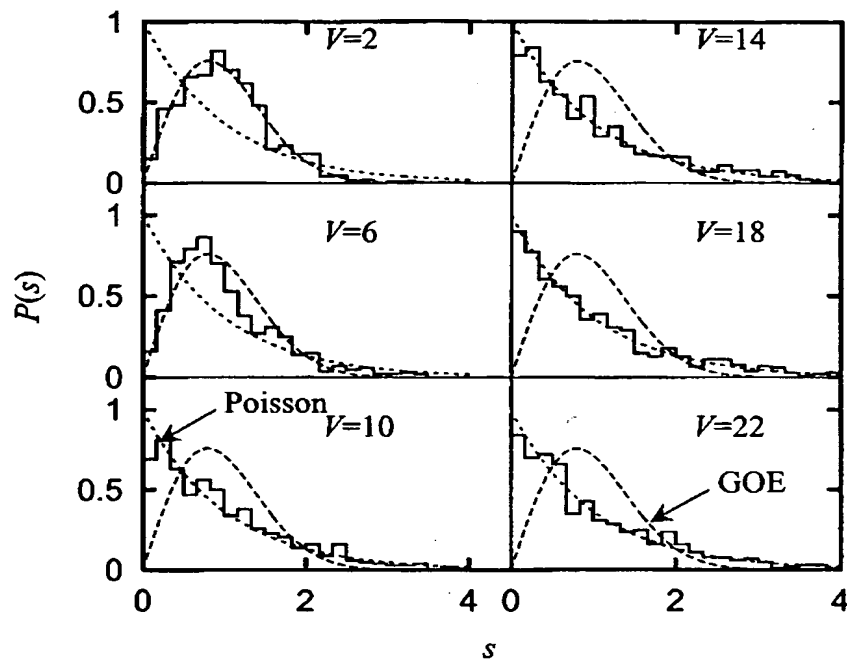
11、12、13…結晶層、14、16…絶縁膜、15、17…電極、18…基板、21～27…結晶層、28、29…電極

【書類名】 図面

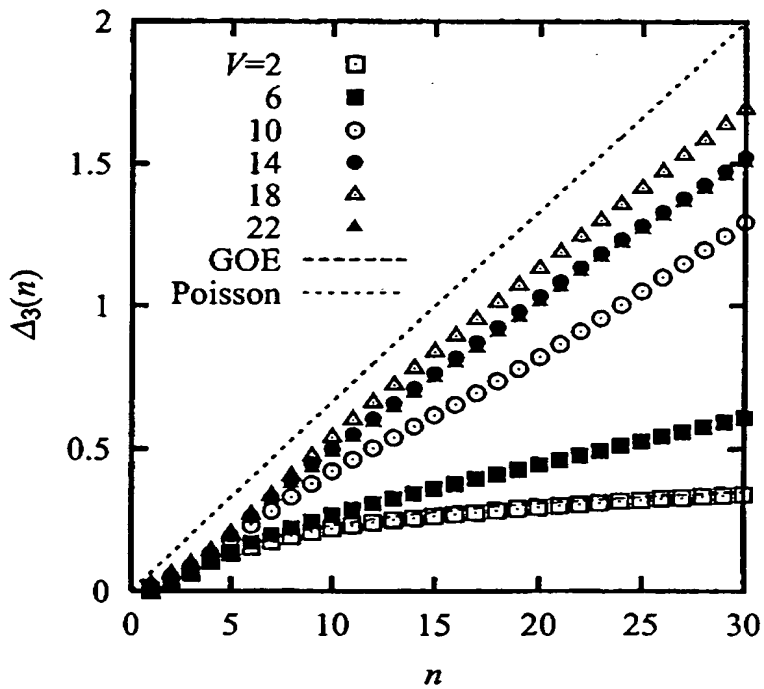
【図 1】



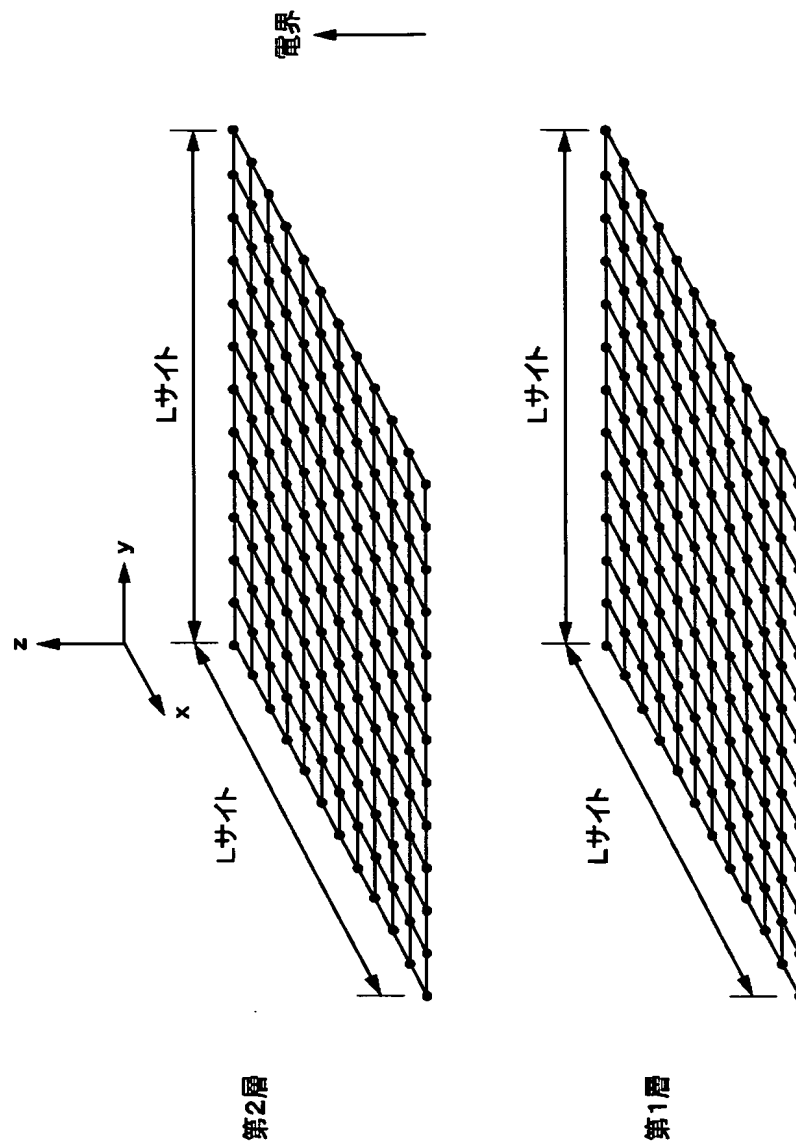
【図 2】



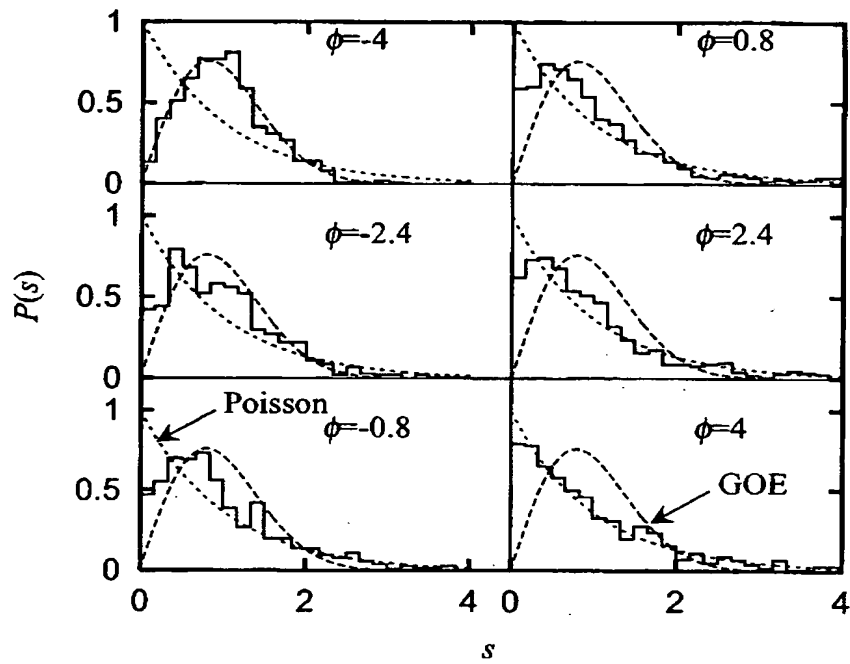
【図 3】



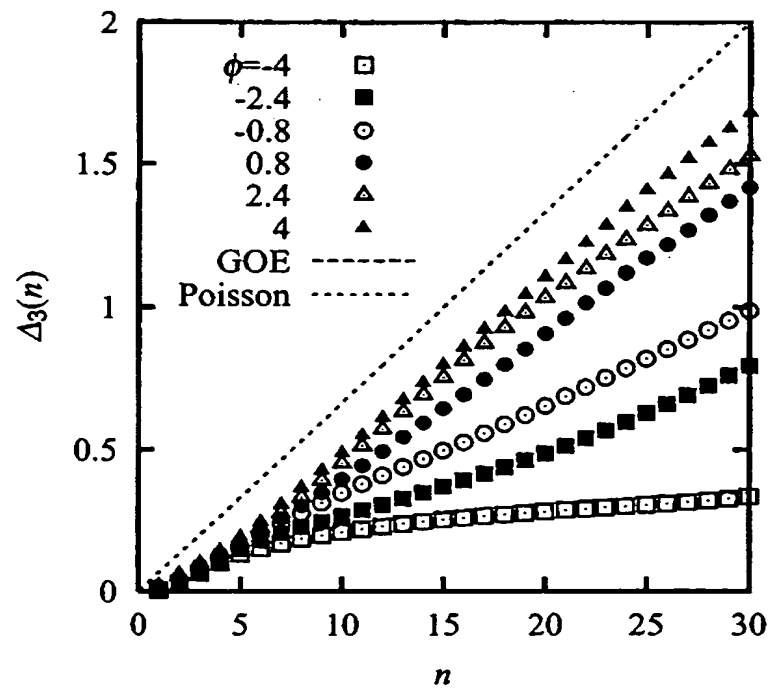
【図 4】



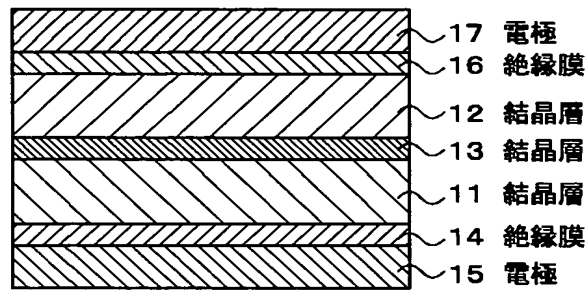
【図 5】



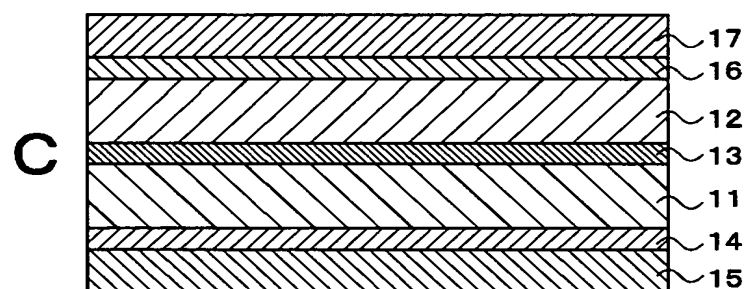
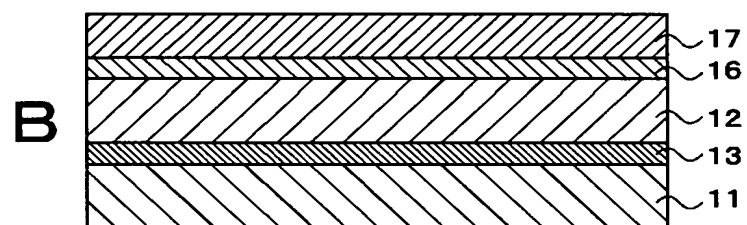
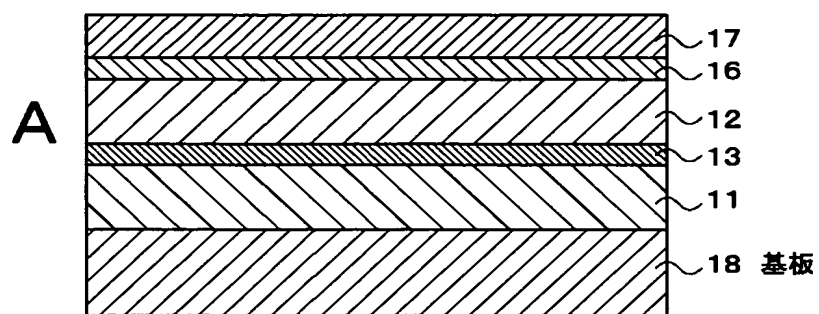
【図 6】



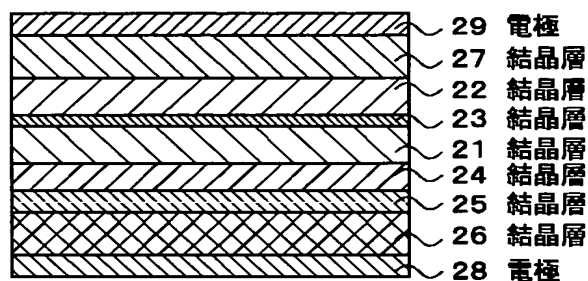
【図 7】



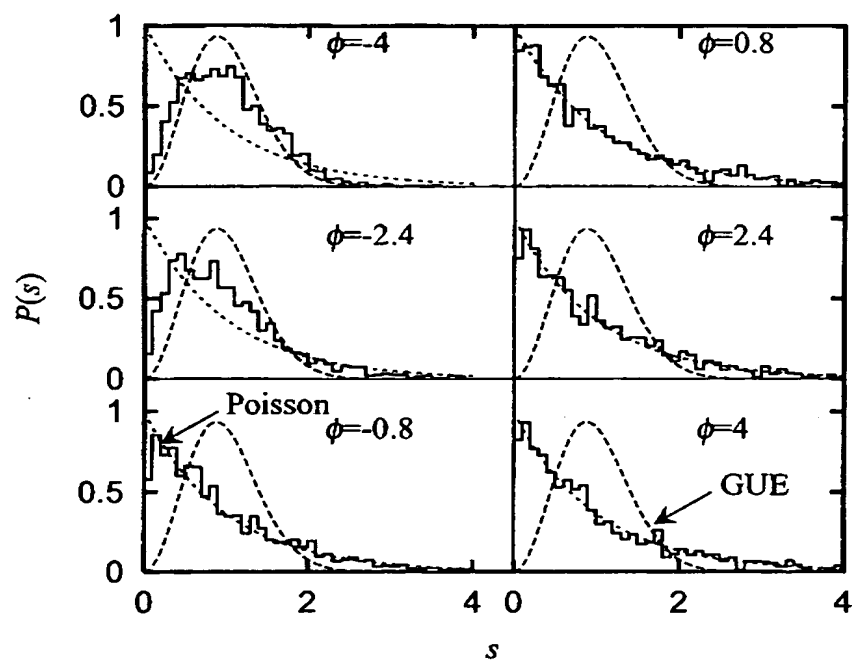
【図 8】



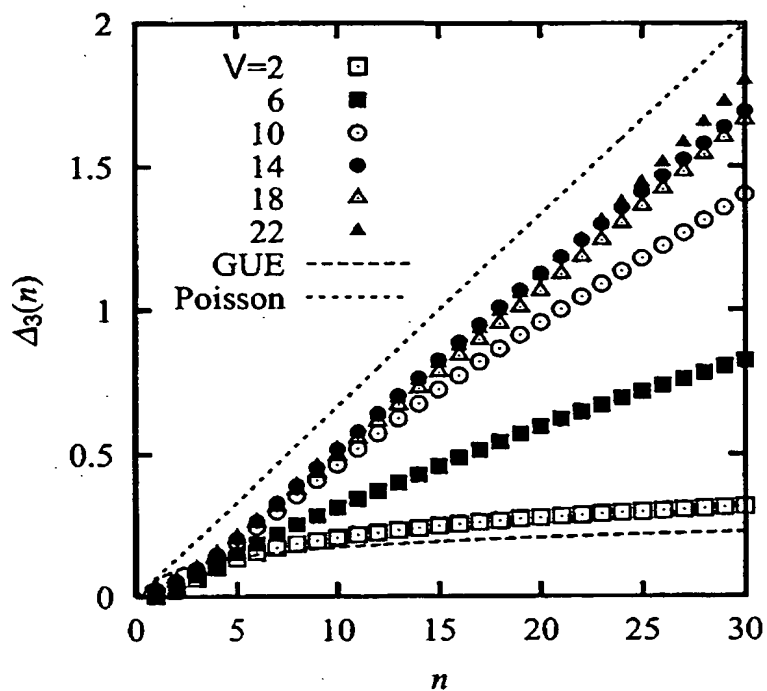
【図 9】



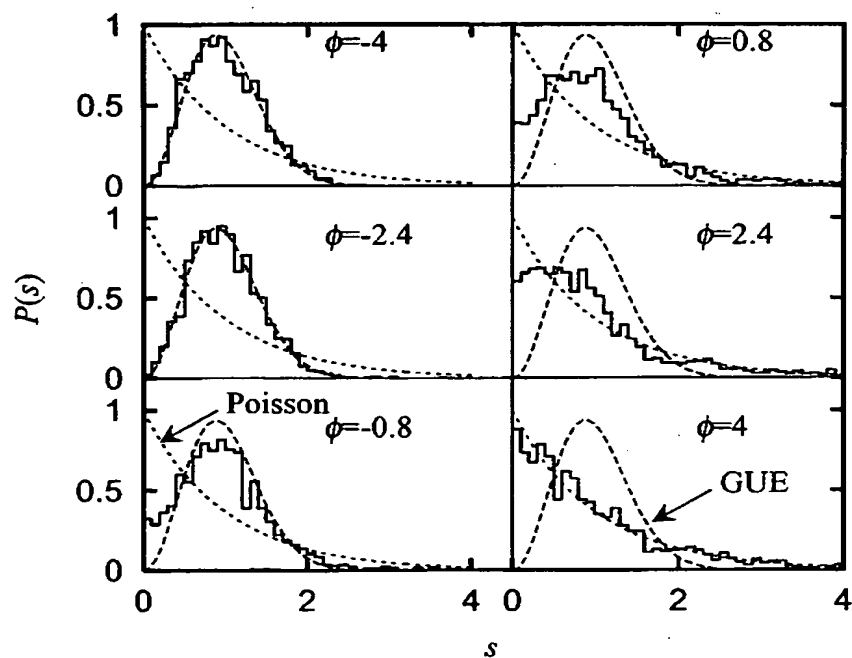
【図 10】



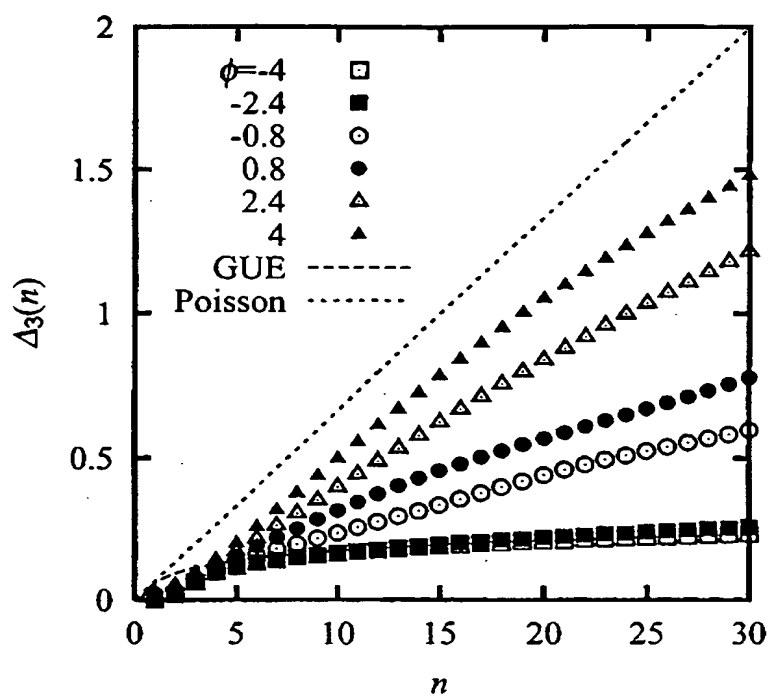
【図 1 1】



【図 1 2】



【図 13】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 量子カオス性を広範囲に、しかも外部から制御することができ、また単一の材料を用いてもそのような広範囲の制御が可能な量子カオス装置を提供する。

【解決手段】 量子カオスによって特徴付けられる電子系を有する第1の領域と、可積分性によって特徴付けられる電子系を有する第2の領域とを、それらの間で電子の授受が可能な状態で互いに隣接して設けてヘテロ接合を形成し、このヘテロ接合に少なくとも接合界面に垂直な成分を有する電界を印加することにより、第1の領域および第2の領域からなる系における電子系の量子カオス性を制御する。

【選択図】 図4

特願 2 0 0 3 - 0 4 8 8 6 3

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[0 0 0 0 0 2 1 8 5]

1 . 変更年月日

1 9 9 0 年 8 月 3 0 日

[変更理由]

新規登録

住 所

東京都品川区北品川 6 丁目 7 番 3 5 号

氏 名

ソニー株式会社